融合到达角的粒子滤波寻源方法研究

绳世尊，肖宇峰[†]，严东，任震宇，杨爽，周意航

（西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室， 四川 绵阳 621010）

摘要: 未知放射源搜寻定位是核安检、核应急领域的重要研究课题。为提高寻源效率、适应多源环境探测，提出了一种融合到达角的粒子滤波寻源方法。首先，构建了自主定位与到达角感知相结合的放射源搜寻硬件平台，给探测器引入了位置和角度信息；其次，在粒子滤波基础上考虑到达角信息，动态收缩放射源搜寻区域，进而提高搜寻效率；最后，在自主寻源路径规划中采用到达角引导的机器人姿态调整，增强机器人寻源的灵活度。仿真实验证明此方法可正确有效工作，利用放射源开展的测试进一步验证了该方法对于多源搜寻的实用性。

关键词: 粒子滤波； 到达角信息； 自主寻源； 多源搜寻

中图分类号: TL81 文献标志码: A doi:

0 引言

目前，我国核电机组数量已进入世界前列，投入核电机组共 55 台，位列全球第二，在建核电机组 22 台，连续多年世界第一[1]。另外，我国放射源和射线装置在放射诊疗、辐照加工、工业探伤、地质勘探、科学研究等领域的应用也十分广泛。截止 2022 年底，全国从事生产、销售、使用放射性同位素的单位共 9 万余家，在用放射源 15.7 万枚，各类射线装置 23 万多台[2]。随着各类放射源大量推广使用，针对丢失源、放射性泄露等紧急情况的应急处置方法正成为保障核工业健康发展的重要课题。

因为大剂量的失控放射源会对暴露在附近的人员造成危害，而且放射源无色无味、不易察觉，如何快速精确的找到放射性热点区域成为失控源应急处置的首要问题。在搜寻和定位放射源方面，国内外专家学者已经进行了长期的研究。早期的定位方法主要依靠在辐射场环境中构建传感器网络，利用几何法、最小二乘法和最大似然估计法处理传感器获得的大量观测数据来估计放射源的位置，例如，Rao 等[3]使用三个核辐射探测器构建了一个固定的传感器网络，然后使用几何法对开阔区域放射源位置进行估计，Howse 等[4]通过在房间内部署四个核辐射探测器形成传感器网络，利用最小二乘法实时估计移动放射源的位置，Curtis 等[5]利用最大似然估计算法，通过系统位置结合每个 NaI 探测器的伽马射线光谱，计算出测量期间最有可能的放射源二维分布图。以上的方法在面对单个放射源估计时非常有效，但不适用于多源估计。当辐射场内存在多个放射源时，观测值是多个源的累积强度，同时放射源的数量也未知。Ding 等[6]使用高斯混合模型和贝叶斯信息准则估计放射源位置，其考虑了辐射场的叠加，但该算法需要已知的辐射源数量。Morelanda 等[7]比较了最大似然估计和贝叶斯估计的结果，他们证明随着放射源数量的增加贝叶斯估计具有更好的精度和效率。

在没有部署传感器阵列的地方，上述方法不能对辐射场内各个位置剂量信息进行精确测量，相比之下，

收稿日期：2024-03-22； **修改日期**：2024-05-07

基金项目：国家自然科学基金资助项目（12175187）

作者简介：绳世尊（1999-），男，河南平顶山人，硕士，从事特种机器人技术研究；E-mail:1601074673@qq.com

[†]**通信作者**：肖宇峰，E-mail:xiaoyf_swit1@163.com

搭载探测器的移动机器人具有更大的优势，由于移动机器人无法瞬时测量整个辐射场，因此序列估计是此类研究的常见策略[8-10]。Mascarich 等[11]根据平方反比定律生成一组潜在放射源，通过后验概率分布对放射源位置进行估计。为提高估计效率，Park 等[12]提出了一种基于多传感器融合的估计方法，该方法可以利用不同传感器的测量结果同时更新粒子权重。关于多源估计问题，Gao 等[13]提出了峰值抑制粒子滤波器（PSPF），将该问题视为非参数估计，其运行时间与粒子层数成正比，Wang 等[14]融合了高斯过程和 PSPF 框架（GP-PSPF），以提高源强度不同情况下的估计精度，Bai 等[15]提出了一种新颖的在线多辐射源估计框架，该方法以增量方式构建贝叶斯估计状态空间，多层粒子同时更新，以适应不同的辐射场景，徐航[16]提出了响应矩阵反卷积方法对地面多放射源分布进行反求解，结果表明该方法可以在未知放射源先验信息的情况下对多枚放射源的位置和活度进行估计。

针对当前使用纯粒子滤波算法对放射源搜寻过程存在定位精度低、只能寻单源等问题，本文提出了一种融合到达角的粒子滤波寻源方法。首先，通过激光雷达构建二维栅格辐射场地图，实现机器人自主导航和定位；其次，使用旋转探测器获得到达角信息，融合改进粒子滤波算法，动态更新粒子集区域；最后，机器人根据到达角信息进行姿态调整，实现对多个未知放射源的渐进式搜寻。本文开展了对放射源搜寻的仿真实验和真实搜寻实验，结果表明该方法的有效性。

1 原理和方法

1.1 核辐射探测模型

本文以各向同性的点源为基础建立辐射探测模型，适当简化理论分析复杂度，再结合工程应用进行调整和优化。假设空气中放射源 A 的活度为 A_s，则探测器在观测点 Θ 处测量得到的辐射计数率为：

$$G(\Theta, A_s) = \frac{A_s s \rho}{4\pi R_{A\Theta}^2} \tag{1}$$

其中 $R_{A\Theta}$ 为观测点 Θ 和放射源 A 之间的欧氏距离(m)，s 为辐射探测器有效探测面积(m²)，ρ 为探测效率。

放射源在空气中会释放 γ 射线，而空气中障碍物对 γ 射线有衰减作用，若不考虑空气衰减系数，则在观测点 Θ 处测量得到的辐射计数率为：

$$G(\Theta, A_s) = \frac{A_s s \rho e^{-\sum_{m=1}^{M} \mu_m \Delta_m}}{4\pi R_{A\Theta}^2} \tag{2}$$

其中 Δ_m 为物质 m 的厚度(m)， μ_m 为物质 m 的 γ 射线衰减系数 (m^{-1})。

任何环境中都存在本底，假设环境中本底计数率为 η_b (cps)，则在观测点 Θ 处经过 τ 秒测量，得到的辐射计数值 λ_Θ 为：

$$\lambda_\Theta = (G(\Theta, A_s) + \eta_b)\tau = \left(\frac{A_s s \rho e^{-\sum_{m=1}^{M} \mu_m \Delta_m}}{4\pi R_{A\Theta}^2} + \eta_b\right)\tau \tag{3}$$

在真实辐射场环境中探测器的探测效率及有效探测面积等参数难以测量，因此定义辐射探测器距离放射源 1m 处的计数率 I_s 为这些参数的计算总和，则辐射计数值 λ_Θ 等效为：

$$\lambda_{\Theta}=(G(\Theta,A_s)+\eta_b)\tau=(\frac{I_s e^{-\sum_{m=1}^{M}\mu_m\Delta_m}}{R_{A\Theta}^2}+\eta_b)\tau \tag{4}$$

若辐射环境中存在 k 个放射源(k>1)，忽略放射源之间的相互作用，放射源活度用 A_j 表示，其中 $1<j\leq k$，则在观测点 Θ 处测量得到的辐射剂量值是 k 个放射源剂量值共同叠加，此时 λ_{Θ} 为：

$$\lambda_{\Theta}=(\sum\nolimits_{j=1}^{k}(G(\Theta,A_j))+\eta_b)\tau \tag{5}$$

探测器在辐射场中能够测量单位时间内的 γ 射线粒子数，该剂量信息存在上下起伏现象，其实际计数率与理论计数率服从泊松分布关系[17-19]，若放射源单位时间内发射 μ 个粒子，辐射探测器在 τ 秒内对粒子计数为 Z 的概率为：

$$P(Z;\lambda)=\frac{\lambda^Z}{Z!}e^{-\lambda} \tag{6}$$

其中 $\lambda=\mu\tau$， $Z\in N^+$ 为实际计数率(cps)， λ 为探测器的期望计数率(cps)。

对于寻源过程中，第 i 点的计数率测量值为 r^i，其对应的理论值为 λ^i，则式(6)可以表示为：

$$P(r^i;\lambda^i)=\frac{(\lambda^i)^{r^i}}{(r^i)!}e^{-(\lambda^i)} \tag{7}$$

1.2 自主定位与到达角感知相结合的寻源

图 1 给出了一台移动机器人自主探测搜寻放射源的工作示意图，机器人搭载核辐射探测器和自主导航系统，对应的核心功能是：放射源位置估计和寻源路径规划。首先机器人通过激光雷达构建辐射场二维栅格地图，机器人在辐射场中沿指定路线行驶，当探测器探测到所处环境中辐射剂量信息达到本底值的两倍时，判定辐射剂量信息异常，辐射探测器开始进行旋转，旋转探测器转动一周采集不同角度数据，同时获得每个角度数据对应的辐射剂量率信息，选取最大剂量率所对应的探测器到达角度信息，将探测器的到达角度信息经过角度变换获得机器人在世界坐标系中的角度信息。最后机器人根据世界坐标系角度信息划定粒子范围，执行改进的粒子滤波算法，实现机器人对放射源的搜寻和定位，并返回放射源在地图中的位置信息到远程工作台。

1.3 探测器工作原理

(1)探测器物理结构

如图 2 所示为探测器局部结构图，整个系统通过 PLC 控制器进行控制，其包含两个伺服电机，分别控制铅桶上下运动和旋转运动。碘化钠探测器位置固定不变，当铅桶移动到最上面时，整个碘化钠探测器将被屏蔽，此时碘化钠探测器只能通过铅桶上的探测孔进行辐射剂量率测量，铅桶旋转可得探测孔在不同角度下所对应的辐射剂量率。

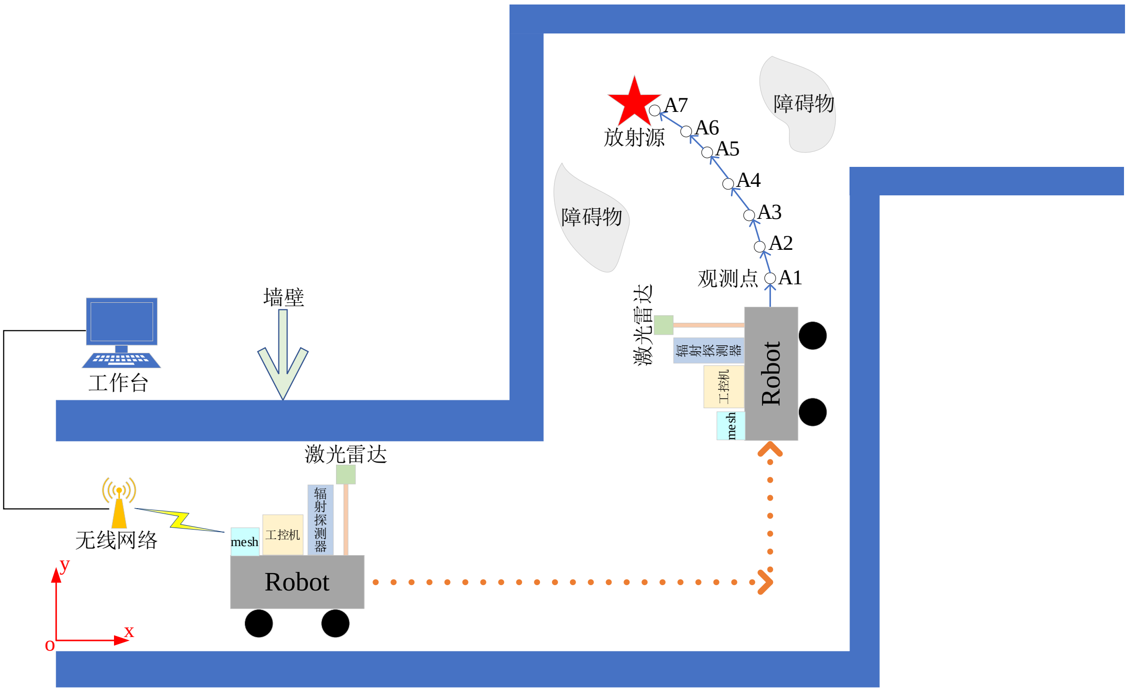


图 1 系统搜寻示意图(在线彩图)

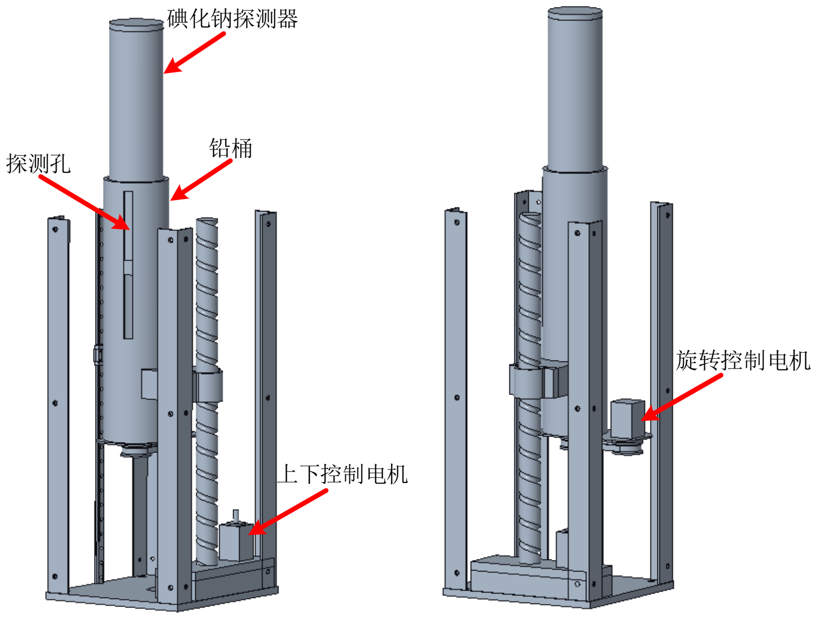


图 2 探测器局部结构图(在线彩图)

(2)探测器工作机制

本文中所使用探测器为碘化钠探测器，其具有高灵敏度、快速响应以及良好的能量分辨率等特点，当碘化钠晶体被辐射时，晶格中的原子被激发，其中部分能量被释放成光子，这些光子向随机方向进行散射，并与晶体内其他原子相互散射，最终被吸收或者逃离晶体。如果光子被吸收，则附近的原子被激发使得更多光子进行发射，利用光电倍增管将这些光子转化为电子，通过对电子进行转化和测量，将其转化为电信号，从而得到辐射剂量率。

假设探测器的辐射剂量率采样频率为 f ，探测器旋转一圈的时间为 T_λ ，对采集的辐射剂量率信息和角度信息进行时间同步，则探测器旋转一圈采集到的辐射剂量率信息和角度信息个数都为 fT_λ 。如图 3 所示为到达角度测试示意图，定义探测器测量角度为 θ_t ，剂量率为 ζ_t ，探测器旋转一圈产生的剂量率信息和角

度信息集合为$\{\theta_t^i,\zeta_t^i\}_{i=1}^{n_k}$，通过比较探测器旋转一圈的剂量率信息找到最大的剂量率$\zeta_{t\max}$，其对应的角度值θ_t^*即为放射源相对于探测器的方向。若放射源与探测器之间存在障碍物，由于放射源和探测器的位置固定不变，并且γ射线具有穿透作用，此方法依然有效。

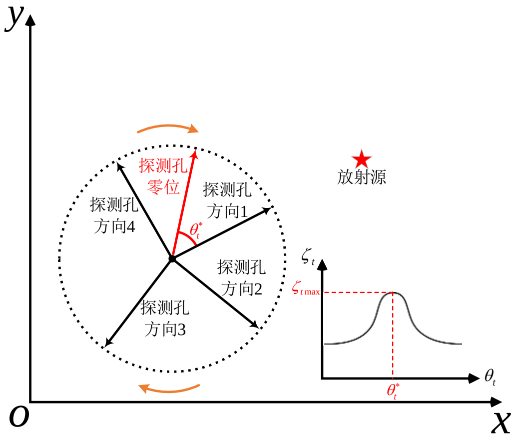


图 3 旋转探测器到达角度测量示意图(在线彩图)

(3)探测器基于到达角测量原理

结合上述探测器的工作原理，本工作采用了一种基于到达角度（AOA，Angle of Arrival）的自主寻源算法。本文定义的 AOA 就是将探测器采集到的辐射剂量率信息和角度信息通过软件代码进行时间同步，获得放射源相对于探测器的所在角度范围，并结合改进的粒子滤波算法，实现机器人对放射源的自主搜寻。

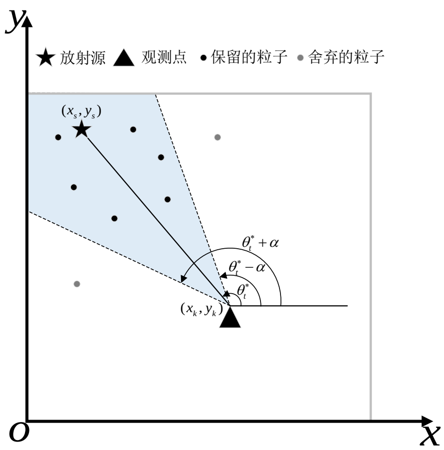


图 4 基于到达角的粒子取舍示意图(在线彩图)

如图 4 所示为基于到达角的粒子取舍示意图，机器人观测点坐标为(x_k,y_k)，放射源坐标为(x_s,y_s)，由于探测器的结构存在角度测量偏差，假设α为允许的最大偏差，则放射源实际测量角度范围为$[\theta_t^*-\alpha,\theta_t^*+\alpha]$。令$\rho_k^i$为粒子$([x_k^i,y_k^i,I_k^i],\omega_k^i)$相对于探测器的角度，定义为 POA（粒子相对角，Particle Observation Angle），表示如下：

$$\rho_k^i=\arctan\frac{y_k^i-y_k}{x_k^i-x_k} \tag{8}$$

其中$[x_k^i,y_k^i,I_k^i]$表示粒子的坐标和强度，ω_k^i表示粒子的权重。

2 融合到达角的粒子滤波估计

寻源机器人在辐射环境下进行剂量信息样本采集时，贝叶斯估计模型很好的解决了机器人根据环境的

稀疏剂量信息来估计放射源位置的问题。本文基于旋转探测器测量获得的到达角对粒子集进行更新，使粒子逐渐收敛至放射源附近，主要包括以下步骤：

(1)系统初始化。假设辐射场环境中存在若干个未知放射源，其参数用向量表示为 $\boldsymbol{A}_j=[A_j^x,A_j^y,A_j^I]^T$，其中 (A_j^x,A_j^y) 表示放射源位置坐标，A_j^I 表示放射源强度信息，j 表示放射源个数；构建粒子集先验模型，在二维平面内均匀产生 N 个带有各自权值 ω_0 的粒子作为样本，其中 k 表示观测次数。每个粒子的参数向量为 $\boldsymbol{X}_0^i=[x_0^i,y_0^i,I_0^i]^T(0<i\le N)$，其中 (x_0^i,y_0^i) 表示粒子位置坐标，I_0^i 表示粒子强度，初始化后粒子集合为 $\{\boldsymbol{X}_0^i,\omega_0^i\}_{i=1}^N$，由于初始化粒子均匀分布，所以具有相同的权重，即 $\omega_0^i=\dfrac{1}{N}$。

(2)权值更新与归一化。在经过 k 次测量后，获得一个新的观测值 Z_k，则此时粒子集 $\{\boldsymbol{X}_k^i\}_{i=1}^N$ 中的每个粒子都表示估计的放射源参数向量 $\boldsymbol{X}_k^i=[x_k^i,y_k^i,I_k^i]^T$，由泊松分布概率，粒子权值更新为：

$$\omega_k^i=P(Z_k\mid\boldsymbol{X}_k^i) \tag{9}$$

其中，权值集 $\{\omega_k^i\}_{i=1}^N$ 满足 $\sum_{i=1}^N\omega_k^i=1$。根据上文提出的到达角度进一步更新粒子的权重，保留粒子相对角在 $[\theta_t^*-\alpha,\theta_t^*+\alpha]$ 范围内的粒子，同时把粒子相对角在 $[\theta_t^*-\alpha,\theta_t^*+\alpha]$ 之外的粒子权值设置为 0，权值更新为：

$$\hat{\omega}_k^i=\begin{cases}\omega_k^i,\rho_k^i\in[\theta_t^*-\alpha,\theta_t^*+\alpha]\\ 0,\rho_k^i\notin[\theta_t^*-\alpha,\theta_t^*+\alpha]\end{cases} \tag{10}$$

然后，将新的权值进行归一化：

$$\bar{\omega}_k^i=\frac{\hat{\omega}_k^i}{\sum_{i=1}^N\hat{\omega}_k^i} \tag{11}$$

(3)粒子重采样。重采样算法有多种可供选择，综合考虑采样质量以及算法复杂度等因素，本工作决定采用系统重采样算法。该算法包含计算粒子累积权重、均匀采样、复制粒子、替换粒子等步骤，使得粒子更加集中在具有较高权重的状态附近，提高估计的准确性，同时避免了因为权重差异较大而导致的样本退化问题。

(4)放射源参数估计。在对粒子集合 $\left\{\boldsymbol{X}_k^i,\omega_k^i\right\}_{i=1}^N$ 进行处理之后，粒子动态收敛到权值较大的区域，通过加权求和可估计出放射源参数，估计值为：

$$\hat{\boldsymbol{X}}_k=\sum_{i=1}^N\boldsymbol{X}_k^i\omega_k^i \tag{12}$$

(5)粒子自适应更新。为解决粒子多样性减少对算法精度的影响，本文根据后验概率分布的复杂度使用正态分布动态调整粒子数目，使得系统随着观测次数的增加，粒子逐渐趋于收敛。

3 到达角引导的寻源规划

机器人自身姿态角计算与调整影响到 AOA 测量和移动路径规划，下面给出了具体方法。

3.1 姿态角调整

本工作采用的旋转探测器安装方式如图 5 所示，探测器正方向与机器人正方向相差$\tilde{\theta}$，此角度偏差是探测器的安装方式导致物理结构设计需要，由于探测器零位方向与机器人正方向不重合，所以需要将探测器的角度值经过角度变换转换为机器人在辐射场地图中的下一步调整角度。

在实际测试环境中，放射源可能存在于机器人周围的任何一个方向，如图 6 所示，探测器可采集的角度范围为$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$，机器人在辐射地图空间中的角度范围为$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$，本文拟根据探测器的安装位置将旋转方向分为 4 个区域，分别为①②③④，图中展示了不同区域探测器的旋转方向，其中五角星标志表示放射源可能存在的位置。

假设探测器测量放射源角度为θ，探测器的角度区间与机器人下一步调整角度对应关系如表 1 所示。

表 1 角度转换关系图

传感器旋转区域	机器人下一步调整角度
区域① $(0^{\circ} \le \theta < \tilde{\theta})$	$\tilde{\theta} - \theta$
区域② $(\tilde{\theta} \le \theta < 180^{\circ})$	$\tilde{\theta} - \theta$
区域③ $(180^{\circ} \le \theta < 180^{\circ} + \tilde{\theta})$	$\tilde{\theta} - \theta$
区域④ $(180^{\circ} + \tilde{\theta} \le \theta < 360^{\circ})$	$360^{\circ} + \tilde{\theta} - \theta$

综上，将区域①②③合并后的角度转换关系图如表 2 所示。

表 2 合并后角度转换关系图

传感器旋转区域	机器人下一步调整角度
区域①②③ $(0^{\circ} \le \theta < 180^{\circ} + \tilde{\theta})$	$\tilde{\theta} - \theta$
区域④ $(180^{\circ} + \tilde{\theta} \le \theta < 360^{\circ})$	$360^{\circ} + \tilde{\theta} - \theta$

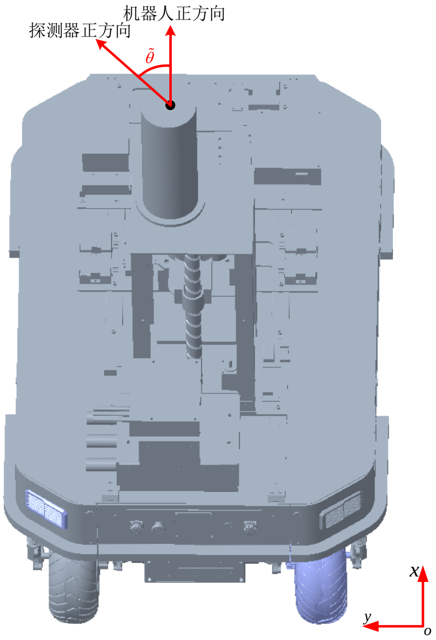


图 5 旋转探测器安装示意图(在线彩图)

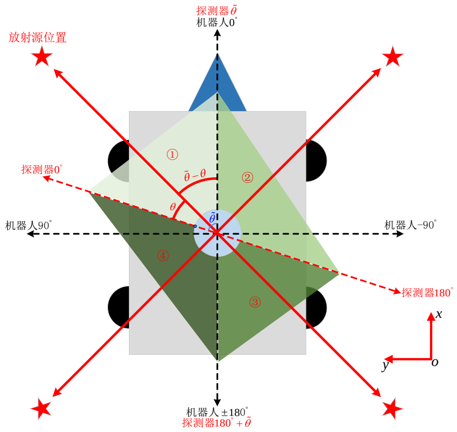


图 6 旋转探测器探测示意图(在线彩图)

3.2 下一观测点规划

当机器人估计出放射源位置时，机器人需要根据步长设置逐步向放射源估计位置靠近。如图 7 所示为机器人观测点设置示意图。$A(x_k, y_k)$ 点为机器人当前观测位置，$B(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ 点为放射源估计位置，$C(x'_{k+1}, y'_{k+1})$、$D(x''_{k+1}, y''_{k+1})$ 两点为机器人下一可能观测位置，则直线 AB 的方程如式(13)所示：

$$y = \frac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x + y_k - \frac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x_k \tag{13}$$

以 A 点为圆心，r 为半径形成的圆的方程如下式：

$$(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 = r^2 \tag{14}$$

将式(13)和式(14)联立可得如下式：

$$ax^2 + bx + c = 0 \tag{15}$$

其中 a、b、c 参数如下式：

$$\begin{cases} a = (1 + (\dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k})^2) \\ b = -2x_k(1 + (\dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k})^2) \\ c = (1 + (\dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k})^2)x_k^2 - r^2 \end{cases} \tag{16}$$

求解式(15)可得 C 点和 D 点的坐标如式(17)所示：

$$\begin{cases} x'_{k+1} = \dfrac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ y'_{k+1} = \dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x'_{k+1} + y_k - \dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x_k \end{cases}, \quad \begin{cases} x''_{k+1} = \dfrac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ y''_{k+1} = \dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x''_{k+1} + y_k - \dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k} x_k \end{cases} \tag{17}$$

通过比较 B、C 两点和 B、D 两点的欧氏距离，获得最短距离对应的点即为下一观测点，角度为

$\arctan\dfrac{\hat{y}_k - y_k}{\hat{x}_k - x_k}$。根据以上过程，观测点逐步靠近估计点，直到观测点位置与放射源估计位置之间距离达到设定阈值并且所有粒子收敛到一个范围，则放射源搜寻结束，此时的放射源估计参数即为最终放射源估计位置。其中距离阈值设定范围需要根据实际应用需求进行设定，较小的阈值可能会导致算法需要更多的迭代次数才能寻源成功，而在一般的放射源搜寻过程中可适当放宽阈值以提高算法效率。

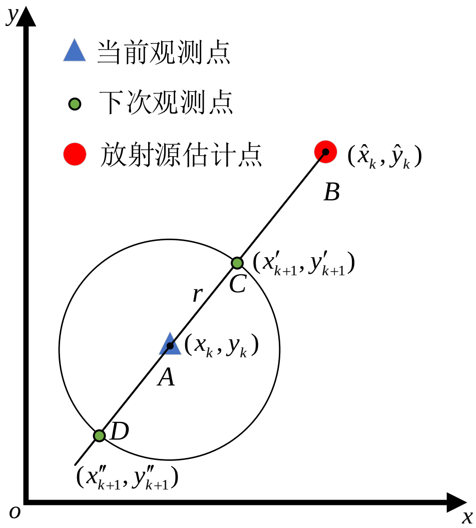


图 7 机器人观测点设置示意图(在线彩图)

3.3 多源定位方法

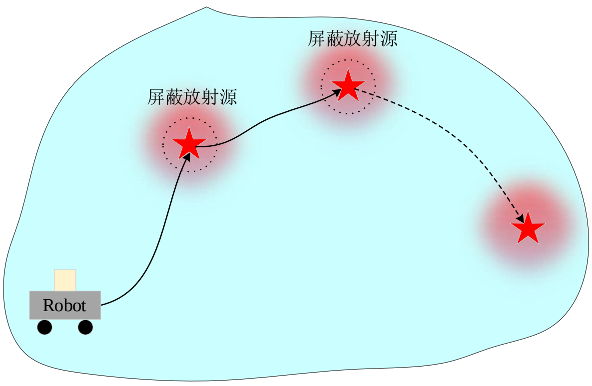


图 8 多源搜寻流程示意图(在线彩图)

针对多个放射源的情形，图 8 给出了该机器人的搜寻示意图。当辐射环境中存在多个放射源时，探测器通过开孔方向找到最大辐射剂量率对应的角度。此角度即为第一个待搜寻放射源的位置信息，将此角度转换为机器人下一步调整角度，机器人朝下一步调整角度移动一次固定步长，之后铅桶下降，碘化钠探测器完全裸露，机器人根据环境中的辐射剂量率信息执行改进的粒子滤波算法，对放射源进行渐进式搜寻，当粒子收敛并且机器人距离放射源估计点小于设定范围即为找到放射源。第一个放射源找到后，收纳该放射源并放置在屏蔽罐中，重复以上步骤寻找剩余放射源。

4 实验结果和分析

4.1 仿真实验与分析

为验证本文提出方法的准确性和有效性，首先在 matlab 软件下开展放射源搜寻仿真实验，计算机采用 intel(2.9GHz)处理器，16GB 内存。

(1)基于角度信息单放射源搜寻

在二维地图上模拟移动机器人放射源搜寻实验，实验场地设置为 30m×30m，机器人寻源起始点为(0m,0m)，待搜寻放射源计数率 I_s 为 8000cps，粒子数目 N 为 5000，其计数率范围为[1000cps,20000cps](根据多次仿真可得，此范围包含放射源计数率可使得粒子收敛更快)，环境中本底辐射计数率 η_b 为 10cps，探测器计数时间 τ 为 10s。设置待搜寻放射源位置为(10m,15m)，图 9 所示为移动机器人搜寻单放射源的整个过程，图 9(a)中机器人在起始点通过旋转探测器获得放射源角度范围，角度范围设置为实际角度±30°，划定粒子区域，图 9(b)、9(c)、9(d)中通过执行改进的粒子滤波算法对放射源位置进行渐进式搜寻，最终定位放射源位置为(10.05m,14.95m)，误差为 0.07m，总耗时 16.57 秒，整个搜寻过程经过了 18 个观测点。在相同设定条件下，图 10 所示为纯粒子滤波算法进行单放射源搜寻，最终定位放射源位置为(9.87m,14.90m)，误差为 0.16m，总耗时 21.43 秒，整个搜寻过程经过了 21 个观测点。为验证本文算法的搜寻效率高，将基于角度信息的单放射源搜寻与纯粒子滤波单放射源搜寻进行对比实验，设置探测区域为 10m×10m、20m×20m、30m×30m、50m×50m、80m×80m、100m×100m，其对应放射源位置为(3m,5m)、(6m,10m)、(10m,15m)、(16m,25m)、(26m,40m)、(33m,50m)，机器人搜寻起点都为原点，其它参数保持不变。从图 11 可以看出随着探测区域增大，基于角度信息单放射源搜寻时间明显少于纯粒子滤波单放射源搜寻。

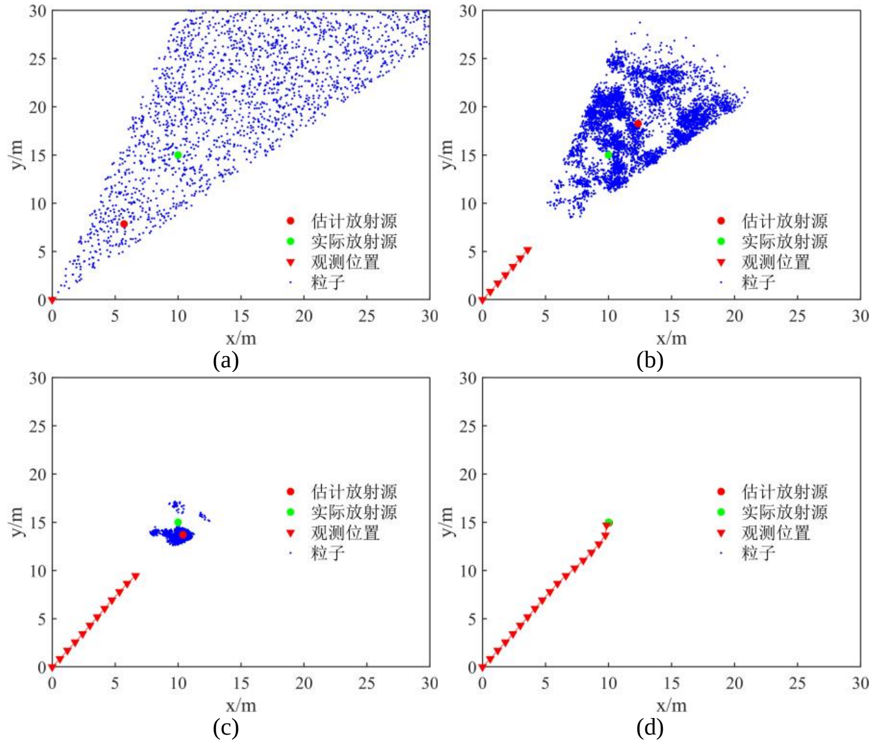
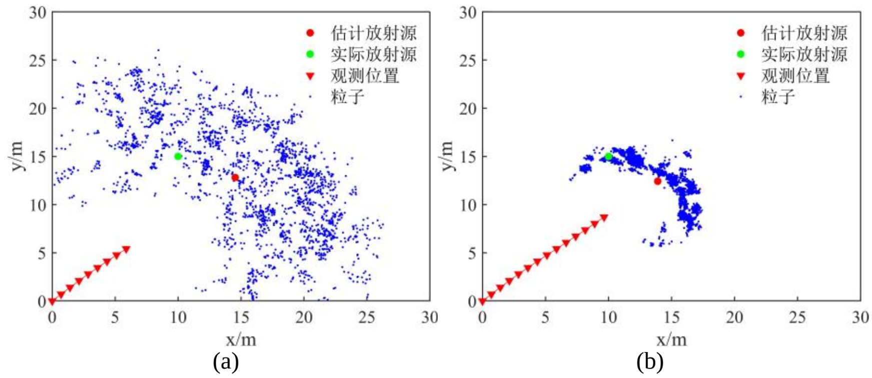
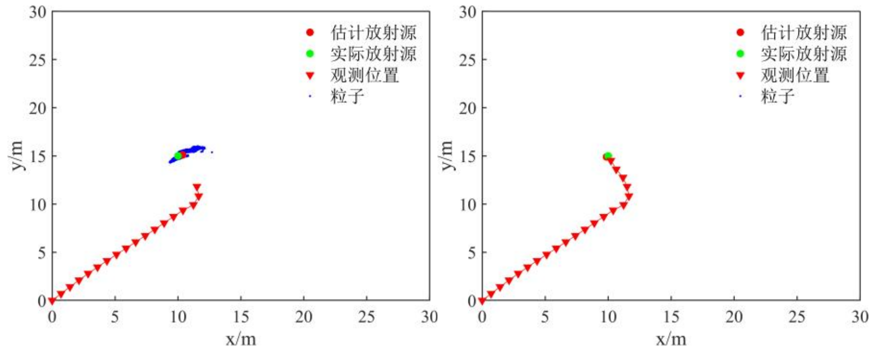


图 9 基于角度信息单放射源搜寻(在线彩图)





(c) (d)

图 10 纯粒子滤波单放射源搜寻(在线彩图)

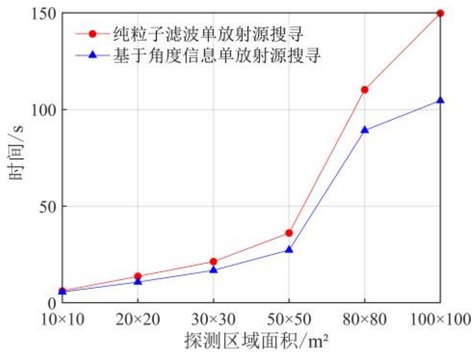
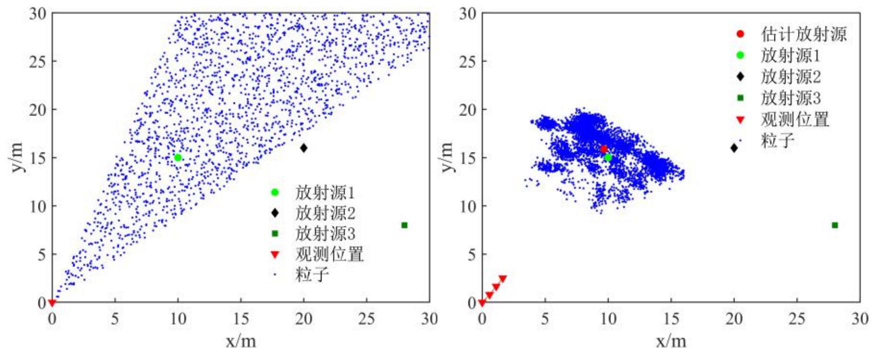


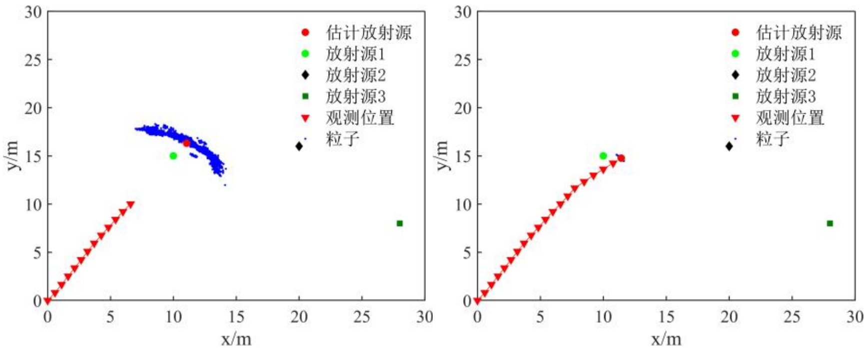
图 11 不同探测区域搜寻时间对比图(在线彩图)

(2)基于角度信息多放射源搜寻

为验证多源的搜寻情况，依然设置 30m×30m 的模拟寻源场地，机器人寻源起始点为(0m,0m)，第一个源的参数与上文中单源的参数一致，第二个放射源计数率 I_s 为 8000cps，位置为(20m,16m)，第三个放射源计数率 I_s 为 8000cps，位置为(28m,8m)，环境中本底辐射计数率 η_b 为 10cps，探测器计数时间 τ 为 10s，粒子数目 N 为 5000，其计数率范围为[1000cps,20000cps]。如图 12 所示为机器人搜寻过程，图 12(a)中机器人在起始点通过旋转探测器测量三个放射源的剂量信息，选取最大的剂量信息对应的放射源为第一个搜寻点，设置角度范围，划定粒子区域，此时机器人受到三个放射源的影响，图 12(b)、12(c)、12(d)中通过执行改进的粒子滤波算法，实现对第一个搜寻点渐进式搜寻。最终定位第一个放射源位置为(11.42m,14.77m)，误差为 1.44m。



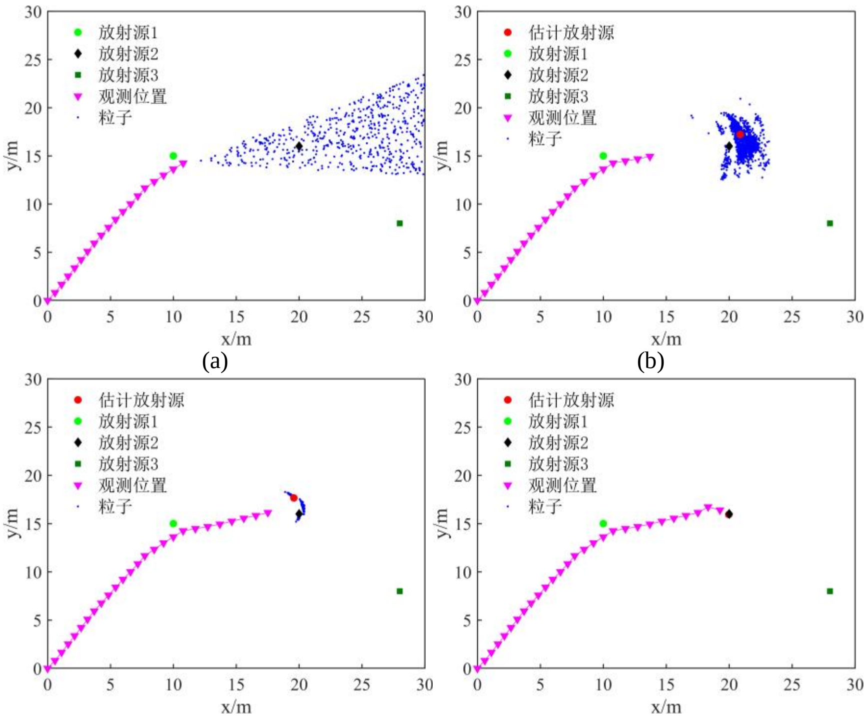
(a) (b)



(c) (d)

图 12 搜寻第一个放射源(在线彩图)

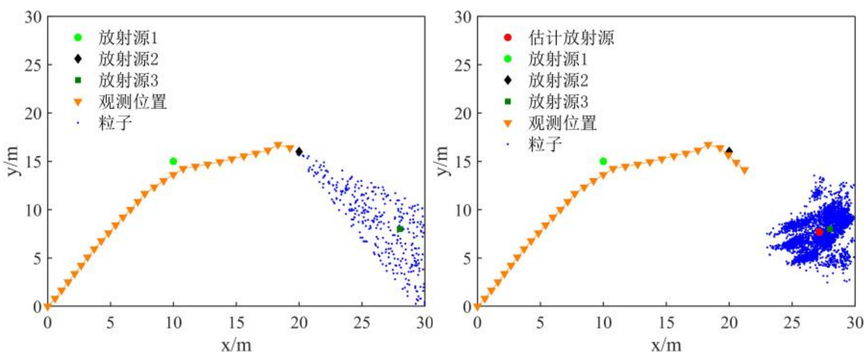
机器人搜寻到第一个放射源后将其进行屏蔽，其将不对后续辐射场产生影响，再次进行系统初始化，对第二个放射源进行搜寻，搜寻过程如图 13 所示，最终定位第二个放射源位置为(19.97m,15.95m)，误差为 0.06m。



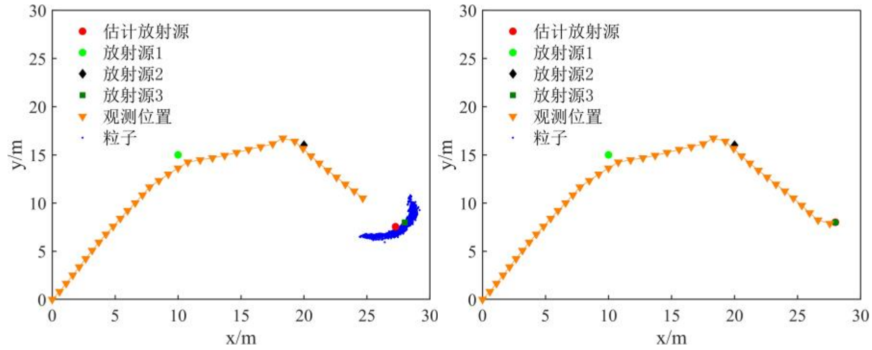
(a) (b) (c) (d)

图 13 搜寻第二个放射源(在线彩图)

重复上述步骤对第三个放射源进行搜寻，搜寻过程如图 14 所示，最终定位第三个放射源位置为(27.99m,8.01m)，误差为 0.01m，总耗时 47.58 秒，整个搜寻过程经过了 40 个观测点。



(a) (b)



(c) (d)

图 14 搜寻第三个放射源(在线彩图)

将单源搜寻和三源搜寻各进行十次仿真实验，其中单源搜寻误差和三源搜寻时的第一个放射源估计误差如图 15 所示，从图中可以看出，三源位置估计误差明显高于单源估计误差，但都在 1.5m 范围内。相比于文献[17]设定固定观测点通过聚类算法进行多源热点估计，本文所提出的 AOA 算法可实现自主定位并搜寻放射源。

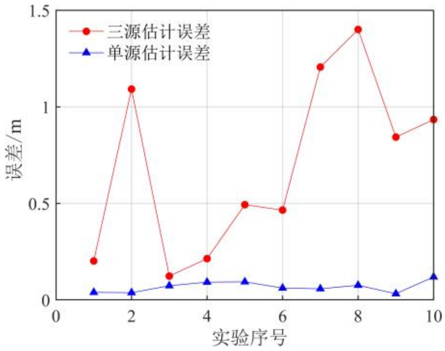


图 15 单源估计与三源估计误差对比图(在线彩图)

4.2 机器人测试实验与分析

图 16 为移动机器人系统，图 17 为实验所使用放射源及辐射环境地图，机器人上搭载 robosense 激光雷达，首先通过激光雷达在辐射场环境中构建二维栅格地图，机器人在 30m×30m 栅格地图中行驶示意图如图 18 所示，将 Co-60 放射源放置在(10.14m,17.16m)处，测量得距离其 1m 处的辐射计数率为 11482cps，机器人开始沿指定路线行驶，在 g_1 点检测到放射源，机器人停止移动，探测器开始上升并旋转（探测器上升表示使用探测孔进行角度测量，下降表示使用整个探测器测量辐射计数率），确定放射源角度范围，更新粒子集，之后探测器下降，开始执行改进粒子滤波算法进行寻源，最终确定放射源估计位置为(10.49m,16.91m)，与真实放射源距离误差为 0.43m。机器人在寻源过程中会到达不同的观测点，如表 3 所示为整个放射源搜寻过程实验数据记录。

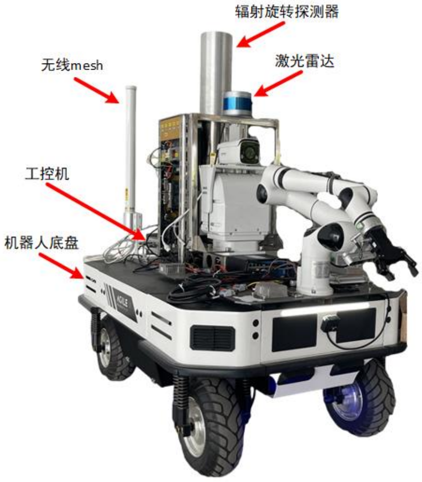


图 16 移动机器人系统(在线彩图)



(a)Co-60 (b)Cs-137



(c)辐射环境地图

图 17 放射源及辐射环境地图(在线彩图)

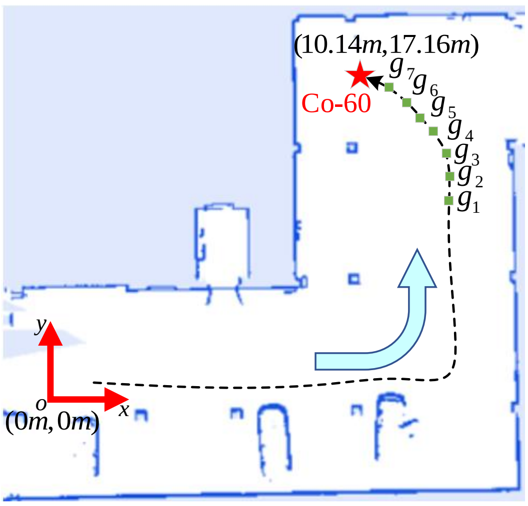


图 18 寻单源测试流程示意图(在线彩图)

表 3 Co-60 放射源搜寻实验数据记录

观测点	观测点坐标/(m,m)	估计位置/(m,m)	误差/m
g_1	(12.59,11.08)	(11.76,12.60)	4.84

g_2	(12.20,12.51)	(11.78,14.35)	3.25
g_3	(11.85,14.09)	(11.43,15.35)	2.22
g_4	(11.08,15.49)	(10.20,16.01)	1.15
g_5	(10.96,16.29)	(9.58,17.10)	0.56
g_6	(10.70,17.04)	(10.64,17.21)	0.50
g_7	(9.90,17.48)	(10.49,16.91)	0.43

为验证机器人多源搜寻效果，如图 19 所示，在辐射场地图中，将另一 Cs-137 放射源放置在(16.13m,19.05)处，距离其 1m 处的辐射计数率为 7173cps，机器人沿指定路线行驶，在 g_1 点检测到辐射异常，探测器开始上升并旋转，确定两个放射源的角度范围，将探测到最大剂量率对应的放射源设为第一个搜寻点，更新粒子集，探测器下降，执行粒子滤波算法进行寻源，最终估计第一个放射源位置为(10.89m,17.38m)，与真实放射源距离误差为 0.78m。将第一个放射源收集屏蔽起来，探测器上升并旋转，确定第二个待搜寻放射源角度范围，粒子初始化并更新，探测器下降，对第二个放射源进行搜寻，最终估计第二个放射源位置为(16.48m,19.10m)，与真实放射源距离误差为 0.35m，如表 4 所示为两个放射源搜寻过程实验数据记录。

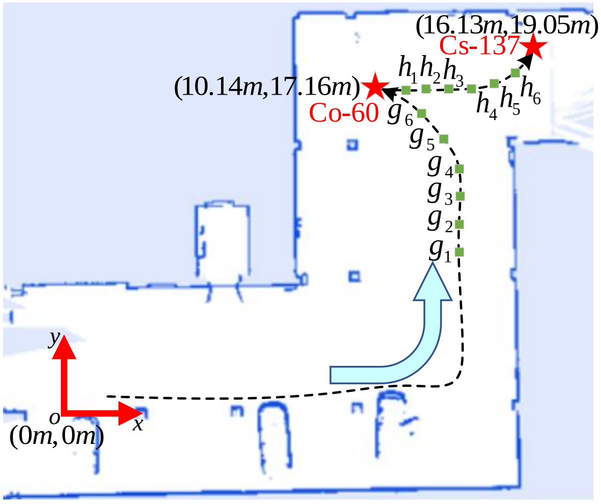


图 19 寻多源测试流程示意图(在线彩图)

表 4 Co-60 和 Cs-137 放射源搜寻实验数据记录

观测点	观测点坐标/(m,m)	估计位置/(m,m)	误差/m
g_1	(13.04,11.85)	(13.14,13.50)	4.73
g_2	(12.83,13.50)	(12.67,15.09)	3.27
g_3	(12.43,14.94)	(12.23,16.65)	2.15
g_4	(12.07,16.65)	(11.62,17.96)	1.68
g_5	(11.51,17.20)	(10.78,18.26)	1.27
g_6	(10.44,17.56)	(10.89,17.38)	0.78
h_1	(10.26,18.10)	(11.65,18.88)	4.48
h_2	(11.94,18.20)	(12.89,18.97)	3.24
h_3	(12.89,18.32)	(14.32,19.16)	1.81
h_4	(14.22,18.54)	(15.40,18.86)	0.75
h_5	(15.42,18.68)	(16.62,19.25)	0.53
h_6	(16.19,18.97)	(16.48,19.10)	0.35

5 结束语

针对未知放射源搜寻问题，本文提出了一种基于角度信息的未知放射源定位方法，机器人通过搭载旋转探测器进行放射源搜寻，通过仿真验证了该方法的准确性和有效性，在真实寻源过程中将放射源相对于探测器的角度转换为放射源相对于机器人的角度，结合改进的粒子滤波算法，大大提高了搜寻效率，实现了机器人自主寻源。而对于在真实环境中多源搜寻，放射源所处环境复杂多样，且相互之间存在干扰，导致放射源估计误差较大，未来将通过优化粒子滤波算法，使用机械臂末端搭载小型辐射探测器辅助搜寻，对局部放射源位置进行精确定位，提升多源搜寻准确度。

参考文献

[1] National Nuclear Safety Administration. 2022 Annual Report of the National Nuclear Safety Administration [EB/OL]. [2023-12-28]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/haqnb_1/202312/P020231218535140311745.pdf(in Chinese).
(国家核安全局. 国家核安全局2022年年报[EB/OL]. [2023-06-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/haqnb_1/202312/P020231218535140311745.pdf)

[2] National Nuclear Safety Administration. China's Nuclear Technology Application Industry Enters the Fast Track [EB/OL]. [2023-09-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202309/t20230905_1040171.html(in Chinese).
(国家核安全局. 我国核技术应用产业驶入快车道[EB/OL]. [2023-09-05]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyzx/202309/t20230905_1040171.html)

[3] RAO N S V, SHANKAR M, CHIN J C, et al. IPSN, 2008, 493-504. doi: 10.1109/IPSN.2008.19.

[4] HOWSE J W, TICKNOR L O, MUSKE K R. Automatica, 2001, 37(11): 1727. doi: 10.1016/S0005-1098(01)00134-0.

[5] CURTIS J C, COOPER R J, JOSHI T H, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2020, 954: 161128. doi: 10.1016/j.nima.2018.08.087.

[6] DING M, CHENG X. ACM, 2009, 10: 125. doi: 10.1145/1530748.1530766.

[7] MORELANDE M, RISTIC B, Gunatilaka A. 2007 10th International Conference on Information Fusion, 2007, 1-7. doi: 10.1109/ICIF.2007.4408094.

[8] LIU HAOJIE, XIAO YUFENG, ZHANG HUA, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2264(in Chinese).
(刘浩杰, 肖宇峰, 张华, 等. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2264. doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0753.)

[9] JIANG MINGMING, ZHAO YONGGUO, LIU CHENGYE, et al. Automation and Instrumentation, 2017, 32(09): 69(in Chinese).
(姜明明, 赵永国, 刘成业, 等. 自动化与仪表, 2017, 32(09): 69. doi: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2017.09.017.)

[10] HUO J, LIU M, NEUSYPIN K A, et al. Sensors, 2020, 20(12): 3461. doi: 10.3390/s20123461.

[11] MASCARICH F, WILSON T, PAPACHRISTOS C, et al. ICRA, 2018, 6537-6544. doi: 10.1109/ICRA.2018.8460760.

[12] PARK M, OH H. Information Fusion, 2020, 54: 72. doi: 10.1016/j.inffus.2019.07.007.

[13] Gao W, WANG W, ZHU H, et al. Sensors, 2018, 11: 3784. doi: 10.3390/s18113784.

[14] WANG W, CAO W, ZHU H, et al. IEEE, 2019, 7: 153885. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2948826.

[15] BAI H, DU Z, ZHU H, et al. Building and Environment. 2023, 236: 110281. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110281.

[16] XU HANG. Academy of Military Sciences, 2023(in Chinese).
(徐航. 军事科学院, 2023. doi: 10.27193/d.cnki.gjsky.2023.000038.)

[17] XIE YUEHUI. Southwest University of Science and Technology, 2023(in Chinese).
(谢跃辉. 西南科技大学, 2023. doi: 10.27415/d.cnki.gxngc.2023.000508.)

[18] ZHANG CHENG, XIAO YUFENG, LIU HAOJIE, et al. Nuclear Physics Review, 2020, 37(04): 867(in Chinese).
(张秤, 肖宇峰, 刘浩杰, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(04): 867. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020030.)

[19] LIU CHAO, XIE YUEHUI, WANG QIANG, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(6): 1225. doi: 10.7538/yzk.2022.youxian.0662(in Chinese).
(刘超, 谢跃辉, 王强, 等. 原子能科学技术, 2023, 57(6): 1225. doi: 10.7538/yzk.2022.youxian.0662.)

A Particle Filter Source Finding Method Incorporating Arrival Angles

SHENG Shizun, XIAO Yufeng†,YAN Dong,REN Zhenyu,YANG Shuang,ZHOU Yihang

(Southwest University of Science and Technology Special Environment Robot Technology Sichuan Provincial Key Laboratory, Mianyang 621010, Sichuan,China)

Abstract: The search and localization of unknown radioactive sources is an important research topic in the field of nuclear security inspection and nuclear emergency response. In order to improve the source finding efficiency and adapt to the multi-source environment detection, a particle filtering source finding method integrating the angle of arrival is proposed. Firstly, a hardware platform combining autonomous localization and angle-of-arrival sensing is constructed to introduce position and angle information to the detector; secondly, the angle-of-arrival information is taken into account on the basis of particle filtering, which can dynamically shrink the source searching area and improve the searching efficiency; lastly, the angle-of-arrival-guided robot attitude adjustment is adopted in the path planning of the autonomous source searching, which can enhance the flexibility of the robot in searching for the source. Simulation experiments prove that this method can work correctly and effectively, and tests using radioactive sources further verify the practicality of this method for multi-source search.

Key words：Particle filtering; Angle-of-arrival information; Autonomous source searching; Multi-source search

Received data: 22 Mar. 2024; **Revised data:** 07 May. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(12175187)

†**Corresponding author:** XIAO Yufeng,E-mail:xiaoyf_swit1@163.com